

A francia metallurgia 100 éves hírnöke: a Revue de Métallurgie

A francia metallurgia 100 éves hírnöke: a Revue de Métallurgie századik születésnapját ünneplő szaklap az egyedüli francia nyelvű folyóirat, amely nemzetközi terjesztésű. A szaklap a magyar, metallurgiával és anyagtudománnyal foglalkozó szakembereknek is fontos és kedvelt irodalmi forrása. A jelen összeállítás tisztelgés a magas színvonalú szaklap előtt, amelyet a 101. évfolyam 5. számában megjelent egyes cikkek ismertetése útján teszünk meg.

The centennial anniversary celebrating technical journal is the exclusive French language journal that is internationally circulated. The trade journal is an important and favourite professional literature source also for the Hungarian professionals dealing with metallurgy and materials science. The present article of ours is a saluting of the high standard trade journal that we do by a review of some articles presented in the 5th issue of the volume 101.

Bevezetés

Ebben az évben ünnepli alapításának 100. évfordulóját a patinás Revue de Métallurgie. Ez az egyedüli a francia nyelvű műszaki folyóiratok közül, amely nemzetközi terjesztésű, tematikáját tekintve a kohászat, a fémten és a széles értelemben vett anyagtudomány egészére kiterjed, és nemzetközileg is rangosnak számít. A tudományos jelentőséget egyfajta értelemben kifejező impaktfaktoros listákon az utóbbi években 0,2 körüli értékkel szerepelt, amely ugyan elmarad a legrangosabb anyagtudományi folyóiratokétól, de különösen annak fényében öröndetes az eredeti tematikájának és nyelvének megőrzése, ha a Zeitschrift für Metallkunde — a szintén patinás, eredetileg német nyelven megjelenő, de már régen angolra váltott folyóiratra — gondolunk. A Revue de Métallurgie-t a kiváló francia fizikai-kémikus, *Henry Louis Le Chatelier* (1850–1936) alapította 1904-ben. A nyitószámba A tudomány szerepe az iparban címmel írott cikkében fogalmazta meg a lap máig érvényes arc poeticáját. Le Chatelier (1. ábra) a fémmikroszkópok fejlesztésével úttörő szerepet játszott a metallográfiai vizsgálatok fejlődésében és elterjedésében is. A Revue közölte elsőként *Frederic Winslow Taylor* (1865–1915), az amerikai Bethlehem Steel szakértője dolgozatát a gyorsacélokról [1], ill. a korszerű üzemszervezésről [2].

A Revue tehát, amely a „műszaki információs füzetek” önmeghatározást használja, idén kezdte a 101. évfolyamát. Évente 11 számot jelentet meg, számonként átlagosan 7-8 szakcikket közöl igényes nyomdai kivitelben, kb. 100 oldalon. A 11 lapszámból 7 elsődlegesen technológiai, 4 pedig természettudományi és anyagtudományi irányultságú. A francia mellett számos angol nyelvű cikket is közöl, az összefoglalóknak viszont a két munkanyelv mellett németül és spanyolul is helyet ad. A megjelenő cikkek színvonaláról alapos lektorálással gondoskodik, és a lap a kolofonjában is jelzi, hogy a Revue de Métallurgie-t a nemzeti tudományos kutatási központ (CNRS) elismeri. A lap saját internetes honlapján keresztül a 2002 előtti számok teljes tartalma on-line elérhető (<http://www.revue-de-metallurgie.fr/>), egyébként pedig 500 euróért fizethető elő.



1. ábra: Henry Louis Le Chatelier



2. ábra: A Revue de Métallurgie 2004. májusi száma

Szervezeti formáját tekintve a Revue de Métallurgie egy részvénytársasági formában működő kiadó, amely tagja a kulturális és tudományos sajtószindikátusnak. A főreszvényes a francia acélipari szövetség (Fédération Française de l'Acier) és az Arcelor Research. Abból ítélve, hogy ez év elején költözött a kiadó és a szerkesztőség Párizs híres Défense negyedébe — valamint abból, hogy a friss számok a következő szám tartalmát is közlik —, arra lehet következtetni, hogy a vállalkozás és a Revue szekere jól halad (bár ez lenne elmondható a még a nálánál is patinásabb magyar testvérlapjáról, a BKL Kohászatról...) A jelen dolgozat további részében a Revue de Métallurgie 101. évfolyamának 5. számában (2. ábra) megjelent egyes cikkek ismertetése olvasható.

Alfred Wilm és a duralumínium kezdetei [3]

A cikk szerzője *O. Hardouin Duparc*, a párizsi École Polytechnique besugárzott szilárdtestek laboratóriumának kutatója. A dolgozatot a XX. század eleji fémkohászat egyik jelentős felfedezésének szenteli. A kiindulópont természe-

* Dobránszky János tudományos főmunkatárs, MTA-BME Fémtechnológiai Kutatócsoport, BME Mechanikai Technológiai és Anyagszerkezet-tani Tanszék

tesen az, hogy a kohóaluminium szilárdsága meglehetősen csekély, viszont már abban az időben is pontosan tudták, hogy a bronzok szilárdságát ón hozzáadásával, az acélt pedig a C-tartalom növelésével és hőkezeléssel lehet jelentősen növelni. A XX. század elején (még vagy is?) a fegyverkezés volt az egyik fő hajtóereje az anyagtudományi kutatásoknak.

II. Vilmos porosz császár hadsereg-fejlesztési politikájának egyik eleme lett a hadi eszközök tömegének csökkentése. Az erre a koncepcióra irányuló törekvések keretében kezdett dolgozni *Alfred Wilm*, a 31 éves kutatómérnök 1900-ban a Berlin melletti Neubabelsbergben a nagy szilárdságú alumíniumötvözetek kifejlesztésén. 1906 őszén jutott el egy Al-Cu-Mn ötvözethez, amelyhez még magnéziumot is adott. A magnéziummal ötvözött, kiválóan keményíthető Al-ötvözet szabadalmát 1909-ben nyújtotta be, amikor *Stribeck* professzorral együtt a Krupphoz távozott.

A Wilm által kidolgozott, nagy szilárdságú alumíniumötvözetek — 0,5% Mg, 3,5–4,5% Cu, 1% Mn — ipari léptékű gyártása Dűrenben, a nagy hadianyaggyárban kezdődött, s a feltaláló a Hartaluminium nevet adta nekik, amely név rövidesen a „Duralumine”-ra módosult, amely tudományosan is és kereskedelmi is jobban megfelelt a nemzetközi szakmai terminológiának. A névadás kapcsán a cikk szerzője jelzi, hogy Dűrenben már más ötvözetek is kaptak hasonló nevet, pl. a Durana-Metalle névre keresztelt, a jobb forgácsolhatóság miatt vassal ötvözött „vasbronzok” és sárgarezek. Azt is a névadásnak a városnévhez kapcsolódó érveként hozza fel Duparc, hogy Dűren kora középkori névalakja „Duria” volt. Mindezek után szarkasztikusan megjegyzi, hogy mégis, ma szinte egyetlen német sem a Dűrener-Alumine-ra gondol a „dur” szócska kapcsán, hanem valószínűleg a zenei hangskálára.

Érdekes tudománytörténeti blama is kapcsolódik a duralumíniumhoz. Egy 1911-es számában a *Kriegstechnische Zeitschrift* megírta, hogy a Dűrenből vásárolt új német fémből, a duralumíniumból épül a brit hadsereg új irányító központjának épületszerkezete. A Vickers Sons & Maxim Ltd. ezután megvásárolta Wilmtől a gyártási jogokat, és 1911-ben elkezdte gyártani Birminghamben a duralumíniumot, ugyanakkor ezzel párhuzamosan kutatásokba kezdett az észak-nyugat-angliai Barrow-en-Furnessben. S mit tesz a sors, két év múlva a kutatási eredményeket közlő, már említett német (!) folyóirat szerkesztőségi cikkben közli, hogy a duralumínium a Vickers barrow-i kutatólaboratóriuma igazgatójának, *H. B. Weeks*-nek a találmánya. Meglepő amnézia, szögezi le Duparc. Természetesen Wilm ugyanebben a folyóiratban azonnal reagál, és tisztába teszi a dolgokat.

Wilm találmányát, amely igen jelentős szerepet kapott a repülőgépipar fejlődésében, sorra alkalmazni kezdték a rivális ipari hatalmak is. Az 1920-as években a duralumínium ismételten „angol találmánnyá” vált, de a dűreni üzemek igazgatója, *Rasmus Beck* ezt ismételten megcáfolta. Az első világháború után *Alfred Wilm* családjával visszatért kedves sziléziai hegyei közé, és az alumíniumötvözetek fejlesztése terén mutatott alaposággal és eredménnyel áttért a jó tojó tyúk fajtanemesítésére, ezen a téren is rangot vívva ki magának. 1937-ben halt meg.

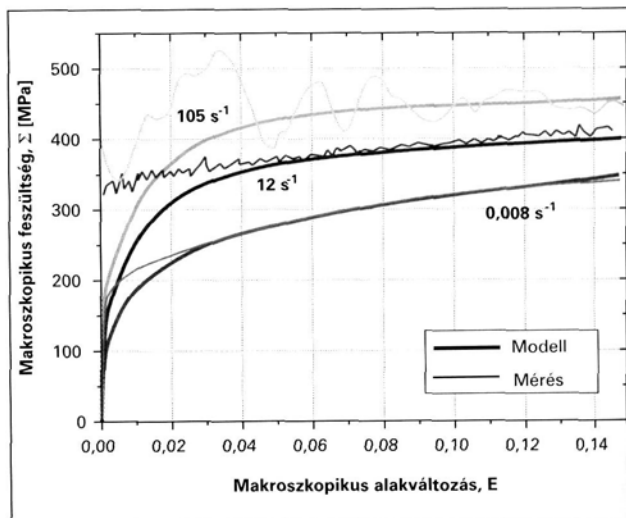
Az IF-acélok és a DP-acélok rugalmas-képlékeny tulajdonságainak mikromechanikai modellezése [4]

A dolgozat szerzői a Metz-i egyetem anyagfizikai és -mechanikai laboratóriumának (Université de Metz, Laboratoire de Physique et Mécanique des Matériaux) kutatói, *V. Favier* és *M. Berveiller*, valamint az Arcelor csoporthoz tartozó termék- és technológiakutató és fejlesztő laboratórium (Laboratoire d'Etudes et Développement des Produits et Procédés) két kutatója, *S. Berbenni* és *X. Lemoine*.

A cikk középpontjában az autópárizi, háztartási-elektromos és épületszerkezeti célra fejlesztett acéllemeztermékek állnak, amelyek esetében a kohászat a lemezvastagság csökkentését kezeli prioritásként, így törekedve a konkurens alumínium- és műanyaglemezekkel szembeni versenyben valami kivételesen felmutatni. Ennek a törekvésnek az egyik eredménye pl. a kiválóan mélyhúzzható, de viszonylag csekély szilárdságú IF-acélok (IF = interstitial free, azaz interstíciós alkotóelemektől mentes) részleges helyettesítése ferrit-martenzit, ill. ferrit-bénit kettős fázisú DP-acélokkal, továbbá BH-acélokkal (BH = bake hardening, azaz lakkbeégetéskor keményedő).

A szerzők célkitűzése abból a kohászati fejlesztési koncepcióból ered, amely szerint az acéllemez mechanikai tulajdonságait a kémiai összetételen túl a mikroszerkezettel és az alakváltozási mechanizmussal együttesen kell kezelni. A kutatási-fejlesztési munkában ezért nagy szerepet kap a polikristályos és a többes fázisú anyagok mechanikai tulajdonságainak modellezése. Az első konkrét célkitűzés: azoknak a reális anyagtörvényeknek a véges-elemes modellezés számára alkalmas leírása, amelyek integrálják a mikroszkopikus skálán lezajló mechanizmusokat: (lemezhenyergelés, termékgyártási célú képlékenyalakítás, károsodási folyamatok, dinamikus hatások stb.). A másik konkrét cél egy mikro-makro modellek (vagy polikristallinmodell) használata az új anyagok kifejlesztése, ill. tulajdonságai gyorsabb optimalizálása érdekében.

A négy francia szerző egy mikromechanikai polikristallinmodellt mutat be, amely az alakítási sebességek széles tartományában képes jellemezni az acéllemez rugalmas-képlékeny viselkedését. A dolgozat első része arra korlátozódik, hogy bemutassa a modellezésben alkalma-



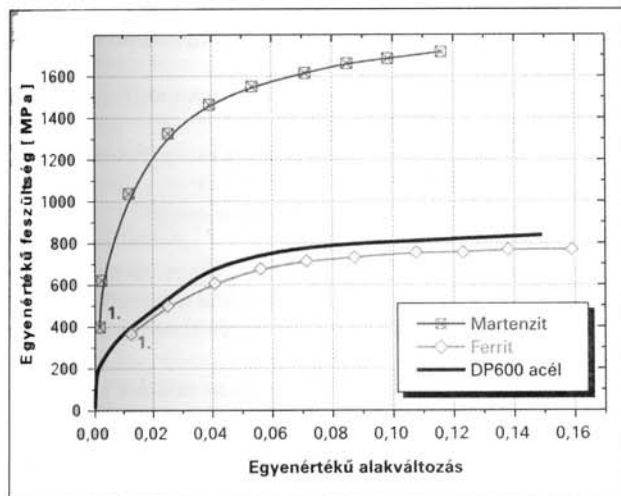
3. ábra: IF-acél feszültség-alakváltozás diagramja modellezés és mérési adatok alapján

zolt léptékviteli módszereket, valamint a térben közép-pontos köbös kristályrácsú egykristályok rugalmas-képlékeny viselkedésének leírását a termikusan aktivált folyamatok elmélete alapján. A második rész ismerteti az IF-acélok és a DP-acélok példáján keresztül a modell alkalmazását egytengelyű húzás esetére a deformációsebesség széles intervallumán.

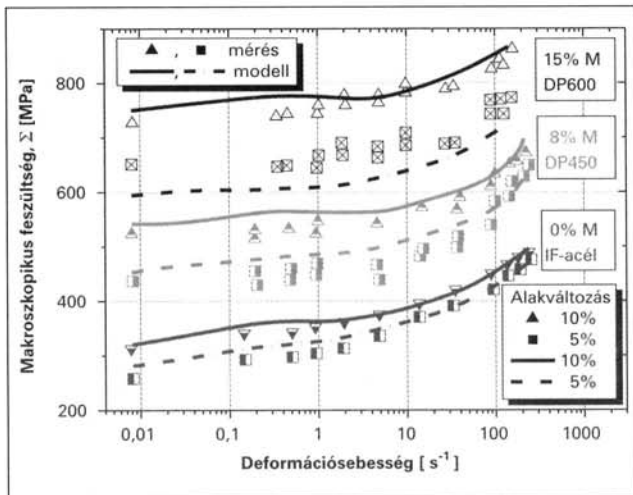
Az IF-acél egyfázisú, csak ferritet tartalmazó acél, átlagos szemcsemérete 20 mikrométer. A hengerlési textúrát a modell elhanyagolja. A modellezés mellett elvégzett mechanikai vizsgálatokat nagy sebességű szakítógépen végezték, amely alkalmas kicsi (5 mm/s, amely az alkalmazott próbatesthossznál $0,05 \text{ s}^{-1}$) és nagy ($10 \text{ m/s} = 250 \text{ s}^{-1}$) sebességű vizsgálatra is. A francia szerzők, stílszerűen TGV-nek nevezik ezt a szakítógépet, miként a szuperexpresszket is. A mérési adatokat és a modellezéssel nyert görbéket a 3. ábra mutatja. A nagy húzásebességnél fel-lépő oszcilláció nem az anyag jellemzője, hanem a vizsgálati körülményekből adódó dinamikus zavarok hatása. A $0,05 \text{ s}^{-1}$ -nél kisebb sebességű vizsgálatokat hagyományos rendszerű Zwick szakítógépen végezték.

A többfázisú mikroszerkezet hatását a dinamikus mechanikai tulajdonságokra ferrit-martenzites szerkezetű kettős fázisú — a Magyarországon is elterjedt néven — DP-acélon végzett modellezéssel és vizsgálatokkal tanulmányozták. A martenzittartalom 8, 10 és 15% volt a három acéltípusnál (DP450, DP500 és DP600). A modellezés szempontjából a DP-acél ferritje az egyfázisú IF-acél ferritjével azonos viselkedésűnek tekinthető, kivéve a szemcseméretet, amely külön paraméterként megadható. A hidedgalakítási jellemzők megadásánál figyelembe veszi a modellt, hogy a ferritszemcsék alakítási szilárdsága növekszik a szemcseméret csökkenésével, és a C-tartalom növekedésével. Ami a martenzitet illeti, erre a fázisra nemigen ismertek még a fizikai jellemzők. Első közelítésként ezért a ferritre vonatkozó alakú anyagtörvényt építették be a modellbe, de a jóval nagyobb szilárdsága okán az aktiválási energiát (a ferritnél $\Delta G=0,862 \text{ eV}$) és a kritikus csúsztatófeszültséget (a ferritnél $\tau_{c0}=90 \text{ MPa}$) erősen megnövelték.

A 4. ábra mutatja a modell alapján az átlagos egyenértékű feszültség változását a ferritben és a martenzitben, valamint a DP600-as acélban 12 s^{-1} alakítási sebesség esetén.



4. ábra: A ferrit, a martenzit és a DP600-as acél feszültség-alakváltozás diagramja mikromechanikai modellezés alapján



5. ábra: A ferrit, a martenzit és a DP600-as acél feszültség-alakváltozás diagramja mikromechanikai modellezés alapján

Az ábrán feltüntetett, 1. jelű állapotig terhelve a kettős fázisú acélt, világosan látható, hogy amíg a ferrit már képlékenyen deformálódik, a martenzit még kvázi rugalmasan viselkedik kb. 1500 MPa feszültségig, ahol elkezdi megfolyni. A modell ezért a martenzit és a ferrit folyási feszültségénél egy 5-ös faktort alkalmaz. Ugyanakkor az ábra azt is jelzi, hogy a DP-acél viselkedése közel esik a ferritéhez. Az IF-acélra és két DP-acélra (DP450 és DP600) az 5. ábra mutatja az 5%, ill. a 10% makroszkopikus alakváltozáshoz tartozó feszültségeket az alakítási sebesség függvényében. Az ábrán a szimbólumok jelölik a mérési adatokat, és a vonalak a modell alapján meghatározott értékeket. Az ilyen diagramot alakítássebesség-érzékenységi diagramnak nevezik. A modelltől adódó vonalak egészen jó közelítést mutatnak a mért értékekkel. A kettős fázisú DP-acélok mechanikai tulajdonságait több tényező is befolyásolja, amelyek a következők: a martenzithányad, a ferrit és a martenzit mechanikai tulajdonságai, valamint a mikroszerkezet. A szemcseméretet és a martenzithányadot a modell figyelembe veszi, ugyanakkor olyan, fémtani szempontból közömbösnek nem tekinthető jellemzőket, mint a martenzit és a ferrit morfológiája, továbbá a fázisok eloszlása, figyelmen kívül hagy. Ezek az elhanyagolások magyarázhatják a mérések és a modell között mutatkozó eltéréseket: a mikroszkópos vizsgálatok pl. egyértelműen mutatják, hogy a DP450 és a DP600 acélban a martenzit morfológiája számottevően eltér: az előbbiben a martenzitzsígek kicsik és finoman dispergáltak, míg az utóbbiban nagyobbak és sávok szerkezetet alakítanak ki. A martenzit mechanikai szerepét a DP-szövetben e különleges morfológiája felerősíti, s ez magyarázza, hogy az 5. ábrán az 5% alakváltozáshoz tartozó mérési adatok a DP600-ra nagyobbak, a DP450-re viszont kisebbek, mint a modelltől számítottak.

A karbon ferritben való oldhatósági határnak kritikai elemzése és meghatározása [5]

A dolgozat szerzői a lyoni egyetem fizikai metallurgiai és fémfizikai kutatólaboratóriumának (INSA de Lyon,

Groupe d'Étude de Métallurgie Physique et de Physique des Matériaux) kutatói, J. Merlin és S. Garnier, valamint az Arcelor csoporthoz tartozó termék- és technológiakutató és fejlesztő laboratórium metallurgiai csoportjának (Laboratoire d'Etudes et Développement des Produits et Procédés) két kutatója, M. Bouzekri és M. Soler. Annyi személyes megjegyzés engedtessek meg, hogy a dolgozatot annál is inkább érdeklődéssel néztem, mivel az első szerzőt személyesen is volt szerencsém megismerni, amikor az Académie de Lyon ösztöndíjával magam is az említett kutatólaboratóriumban dolgoztam négy évvel ezelőtt.

Anakronisztikus kérdés a ferrit C-oldóképességéről beszélni, mondhatják sokan, hiszen először is az első Fe-C fázisdiagram több mint 100 éves, másodszor soktucat tanulmányt tettek már közzé e tárgyban, s végül számos új fázisdiagram áll a kutatók rendelkezésére. Mindezek ellenére azt kell konstatálni, hogy a ferrit karbonoldó képességéről nagyon kevés adatot találni. A leglényegesebb adat az, hogy a „tisztá” vas maximális C-oldóképessége 0,021 tömeg-% (az adat hibája $\pm 2\%$) az eutektoidos hőmérsékleten. Ennyi információ nem igazán mondható elégségesnek az acélfejlesztők és az acélipari kutatók számára, akkor, amikor tucatjával jelennek meg az „ultrakis” C-tartalmú acélok típusai, amelyek C-tartalma éppen az itt megadott oldhatósági határ környezetében található.

Léteznek ugyanakkor más, rendszeresen — de általában az eredeti forrás megjelölése nélkül — visszatérő adatok is, amelyek pontosabbnak tűnnek, abból adódóan, hogy analitikusan lettek meghatározva egy Arrhenius-típusú összefüggéssel: $C = C_0 \cdot \exp(-Q/RT)$. Adatszerűen a $C(\text{tömeg}\%) = 2,55 \exp(-4850/T)$ formában találkozni vele a legtöbbször, és a dolgozat szerzői szerint Dijkstra 1940-es évek végi munkájából való, amelyet Philbert és szerzőtársai idéznek először.

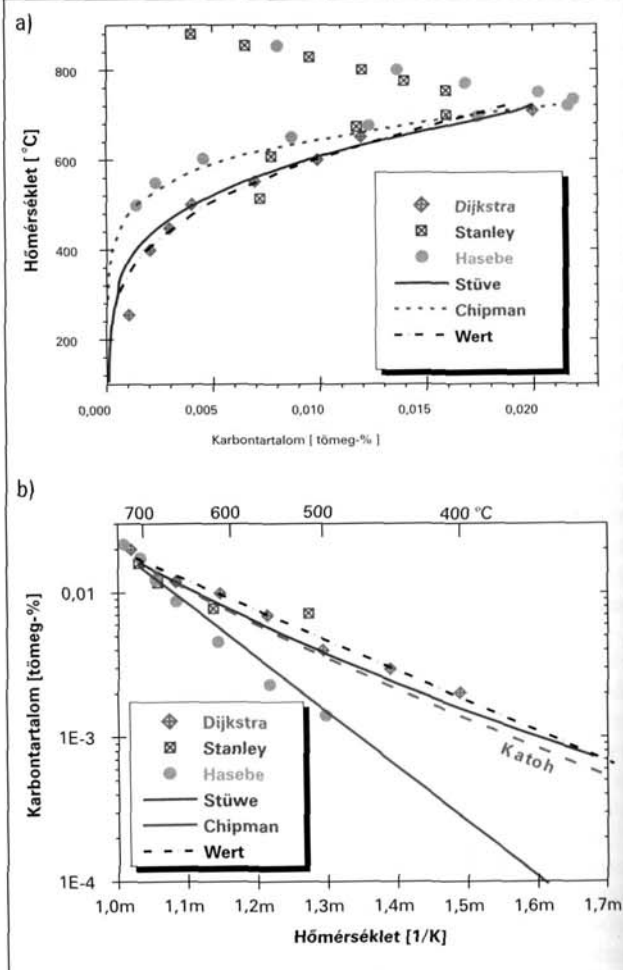
A szakirodalomban óriási szóródás figyelhető meg a ferrit C-tartalmát illetően: pl. az 1. táblázat ízelítőt ad abból, hogy a ferrit 600 °C-on becsült C-tartalmára nézve milyen adatok láttak napvilágot:

1. táblázat: A ferrit C-tartalma 600 °C-on

	Dijkstra	Stanley	Wert	Chipman	Stuwe	Hasebe	Katoh	Zhu
	1949	1949	1950	1972	1975	1985	1985	1996
% C	0,010	0,0076	0,0056	0,0057	0,0094	0,0046	0,0094	0,0086

Látható a táblázat adataiból, hogy az oldhatósági értékek előbb a felére, majd ismét a duplájára módosultak, anélkül, hogy az évtizedek során bármilyen konvergencia kikristályosodott volna. Dijkstra adatát szinte minden szerző megkérdőjelezi, talán azért, hogy az elsőséget elvitassa, de miért kellene igaznak elfogadni a fázisdiagram-gyűjtemények, pl. Massalski vagy a Metals Handbook választását, amelyekben 0,006% körüli értéket adnak meg a 600 °C-os oldhatóságra, a jelek szerint Chipman eredményeit elfogadva.

E bevezető után fogalmazzák meg a szerzők munkájuk motívumaként azt, hogy miért kaphatnak fontosságot a jelen helyzetben a pontosabb információk: az alumíniummal csillapított acélok gazdasági jelentősége nem kérdéses, elegendő csak a csomagolóipari és az autóiipari alkalmazásaiakra gondolni. Az új összetételek és egyes gyártási mű-



6. ábra: A ferrit karbontartalmára vonatkozó legfontosabb szakirodalmi adatok.

A 6/a ábra a $T[^\circ\text{C}] = f(C[\%])$, a 6/b ábra pedig a $C[\%] = f(1/T[\text{K}])$ függvényt jeleníti meg

veletek — különös tekintettel a folyamatos lágyításra — optimalizálása feltétlenül hasznát látná annak, ha a ferrit karbontartalmának hőmérsékletfüggése pontosabban ismertté válna. Az 1. táblázatban említett szerzők munkájának rövid, de izgalmas szakirodalmi elemzést a szerzők a 6. ábrával szemléltetik a hagyományos diagramon, ill. az Arrhenius-típusú összefüggést jobban érzékeltető módon (6/b ábra), végül pedig közlik a legjellemzőbb összefüggéseket:

— Philbert és Okamoto (Dijkstra nyomán):

$$C = 2,55 \exp(-9,7/RT),$$

— Chipman: $C = 230 \exp(-18,6/RT)$,

— Stüwe: $C = 6,46 \exp(-11,4/RT)$ és

— Katoh: $C = 9,65 \exp(-12,1/RT)$.

Az exponenciális tag konstansánál 2-szeres, az együtthatónál pedig kb. 100-szoros eltérés alapján a szerzők annak a kételyüknek adnak hangot, hogy e két konstansnak bármilyen fizikai tartalma lenne!

Mindezek után a lyoni egyetem és az Arcelor kutatói azt a kísérletüket ismertetik, amellyel céljuk a ferrit egyensúlyi karbontartalmának és a cementit tartalomnak a hőmérséklettel való változásának meghatározása volt egy alumíniummal csillapított, kis C-tartalmú, standard összetételű acélban, amely csomagolóanyagként való felhasználásra készült. A vizsgált anyag kémiai összetételét a 2. táblázat

tartalmazza. A felhasznált minták 0,25 mm vastagságú, lágyított állapotú lemezből származtak, az átlagos szemcseméret 20 mikrométer volt. A Mn-tartalom relatíve kicsinek számít, s ez csökkentőleg hat a ferrit C-oldóképességére. A ferrit maximális C-tartalmánál kicsivel nagyobb érték (300 ppm) lehetővé teszi, hogy a kísérlet során a ferrit teljes C-ban való telítődése megvalósuljon.

2. táblázat: A vizsgált acél kémiai összetétele

Alkotó	C	N	P	S	Mn	Si	Ni	Cr	Cu	Al	Ti
ppm	300	54	80	130	2360	80	270	550	250	740	<10

A kísérlet keretében elvégzett hőkezelést kloridos sófürdőben hajtották végre, amely nagy hevítési sebességet biztosít, a hűtést pedig vízben való edzés jelentette. A vizsgálatokat 20 °C-on hajtották végre, mégpedig oly módon, hogy megmérték a minták termoelektromos erejét. A termoelektromos erő extrém érzékenységgel követi a mikroszerkezet-változásokat. Meg kell itt jegyezni, hogy éppen ezek a lyoni tapasztalatok vezettek arra, hogy a Széchenyi Terv keretében elnyert, a BAYATI által vezetett NKFP-projekt forrásaiból egy ilyen mérőberendezést vásároltunk a BMA Anyagtudomány és Technológia Tarszékére.

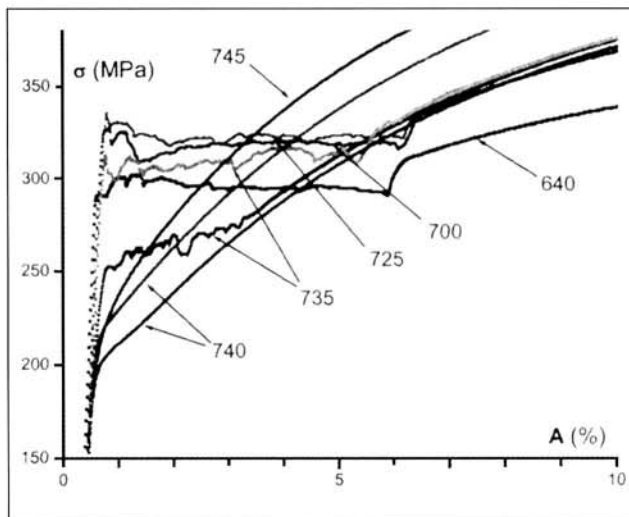
A vizsgálati metodika alapos ismertetése után a szerzők bemutatják, hogyan függ össze az oldott C-tartalom és a Seebeck-állandón mint fizikai anyagjellemzőn alapuló termoelektromos erő mért értéke. Ezt követően ismertetik a „direkt” és az „indirekt” C-adagolási módszerüket, amellyel a ferrit C-tartalmát lehet egészen pontosan szabályozni. Az indirekt adagolási módszer keretében a mintát 270 °C-on annyi ideig tartják hőn, hogy biztonságosan kialakuljon a ferrit–cementit egyensúly. 24 órás öregítési időt alkalmaztak, amely alatt a karbon túlnyomó része intragranuláris cementitként vált ki, amelynek semmilyen hatása nincs a termoelektromos erőre, miként más, szemikohérens, ill. inkohérens kiválásoknak sem, ha térfogathányaduk 1% alatt marad. Az ebben az állapotban mért termoelektromos erő a bázisérték, amelyhez képest lényegében minden változás a ferrit C-tartalmának növekedésével függ össze. A ferrit C-tartalmát a 270 °C-os öregítést követően 500–770 °C közötti szisztematikus hőkezelésekkel változtatták, amelyeket edzés és a minták azonnali mérése követett.

A direkt adagolás esetében a mintákat 70%-os mértékű hengerléssel alakították, hogy jelentősen megnöveljék a diszlokációsűrűséget. Ez azért hasznos, mert az oldott karbon a diszlokációk Cottrell-felhőin könnyen szegregál. Közvetlenül a hengerlés után, majd egy 120 °C-os, 30 perces öregítő hőkezelés után megmérték a termoelektromos erőt, igazolták, hogy az összes karbon kivált a szilárd oldatból. A direkt adagolás tehát azt jelenti, hogy a karbon a ferriten belüli forrásból — a diszlokációkon kivált cementitből —, az indirekt adagolás pedig azt, hogy a ferrit-szemcsék közötti forrásból, a tercier cementitből viszik be az oldó hőkezelés során a ferritbe. Az eredményeket a 3. táblázat foglalja össze.

A táblázat adataiból jól látható, hogy kb. 730 °C-ig nincs érdemi különbség a kétféle módon dozírozott minták között, viszont a felett az indirekt adagolású minták rendre 10–20 ppm-mel több C-tartalmat mutatnak. Nyilvánvaló, hogy az ACI hőmérséklet meghaladása után a

3. táblázat: A ferrit C-tartalmának változása a C-adagolás módja szerint

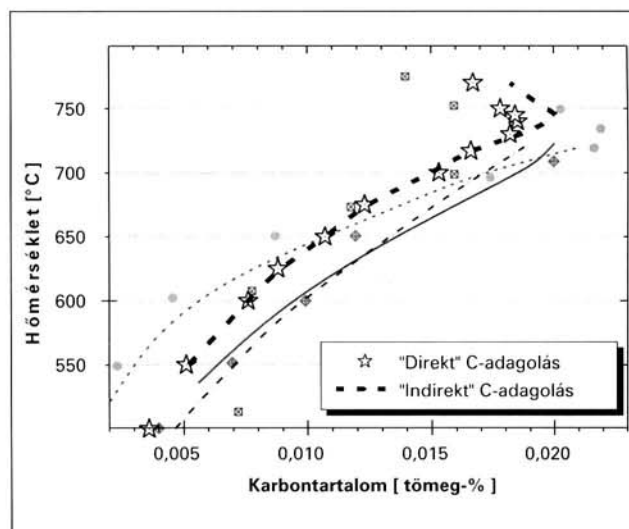
T [°C]	500	550	600	625	650	675	700	717	730	740	745	750	770
[C] _{dir} ppm	36	51	76	88	107	123	153	166	182	185	184	178	167
[C] _{indir} ppm	–	52	76	88	108	122	151	164	188	197	202	196	182



7. ábra: Az alumíniummal csillapított 0,2% Mn-tartalmú acél próbatetek szakítógörbéje az oldó hőkezelés hőmérséklete függvényében

tercier cementitből a ferrit mellett ausztenit is kialakul, amely C-ben dúsulva alakul át martenzitté. Természetesen az a C-adagolási módszer, amely az intersztíciósoknak a homogén ferrites mátrixon belüli kiválásán alapul, nem érintett sem a martenziten belül lejátszódó öregedési jelenségektől, sem pedig a mikroszerkezet kompozit jellegétől.

Az imént leírt módon hőkezelt minták szakítógörbéjének a folyási szakaszra eső részét mutatja a 7. ábra. Jól ismert, hogy már néhány % martenzit jelenléte is a kifejezett folyáshatár eltűnését okozza: ez jellemző a DP-acélokra. A kísérlet viszont rávilágított arra, hogy 735 °C körüli hőmér-



8. ábra: Az alumíniummal csillapított 0,2% Mn-tartalmú acél „egyensúlyi” fázisdiagramja és a szakirodalmi adatok összehasonlítása

sékletről végzett edzések eredményit tekintve — amely hőmérséklet a jelek szerint a szóban forgó acél AC1 hőmérséklete — létezik egy átmenet a folyáshatár eltűnése irányába.

A 3. táblázat adatait is tartalmazó 8. ábra alapján a szerzők végül megadják a saját kísérleteik eredményeiből következő összefüggést: $C [\text{tömeg-}\%] = 6,63 \exp(-11,8/RT)$, ahol az aktiválási energia dimenziója kcal/mol, hogy összevethető legyen a régi szakirodalmi adatokkal.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] F. W. Taylor: La taille des métaux. *Revue de Métallurgie*, 4 (1907) 39–65, 233–336, 401–466.
- [2] F. W. Taylor: Direction des ateliers, *Revue de Métallurgie*, 4 (1907) 633–736.
- [3] O. Hardouin Duparc: Alfred Wilm et les débuts de Duralumin, *Revue de Métallurgie*, 101 (2004:5) 353–360.
- [4] V. Favier, M. Berveiller, S. Berbenni, X. Lemoine: Modélisation micromécanique du comportement élastique-viscoplastique des aciers IF et Dual-Phase. *Revue de Métallurgie*, 101 (2004:5) 381–389.
- [5] J. Merlin, S. Garnier, M. Bouzekri, M. Soler: Analyse critique et détermination de la limite de solubilité du carbone dans la ferrite. *Revue de Métallurgie*, 101 (2004:5) 403–412.